

# OPTICAL TRANSMISSION APPARATUS WHICH USES METAL FILM HAVING APERTURE AND PERIODICALLY VARYING SURFACE PROFILE

Publication number: JP2004070288

Publication date: 2004-03-04

Inventor: THOMAS EBSON; GRUPP DANIEL; THIO TINEKE;  
LEZEC HENRI

Applicant: NIPPON ELECTRIC CO

Classification:

- international: G02B21/00; G02B5/18; G02B5/20; G02F1/01;  
G03F1/08; G12B21/06; H01L21/027; G02B21/00;  
G02B5/18; G02B5/20; G02F1/01; G03F1/08;  
G12B21/00; H01L21/02; (IPC1-7): G02F1/01;  
G02B21/00; G03F1/08; H01L21/027

- European: G01Q240/20; G01Q240/204; G01Q260/00; G02B5/18D;  
G02B5/20M; Y01N8/00; Y01N10/00

Application number: JP20030150755 20030528

Priority number(s): US19980208116 19981209

Also published as:

EP1008870 (A1)  
US6236033 (B1)  
JP2000171763 (A)  
EP1008870 (B1)

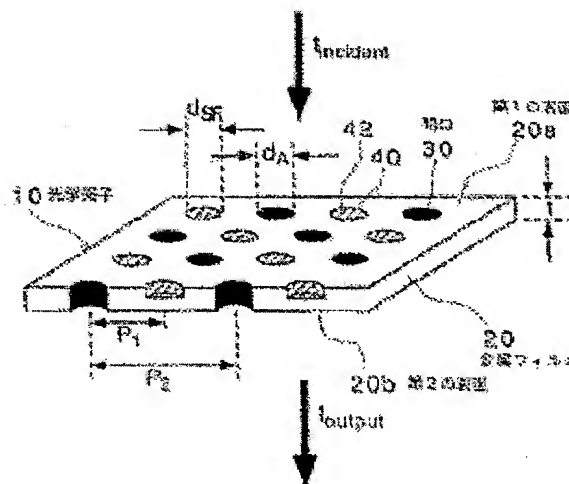
Report a data error here

## Abstract of JP2004070288

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To provide an optical transmission apparatus for enhanced optical transmission by giving a periodical surface profile to a metal film which can not be realized in a conventional type and allowing the metal film to firmly couple with incident rays.

**SOLUTION:** The apparatus includes a metal film having a first surface and a second surface, at least one aperture formed in the metal film and penetrating from the first surface to the second surface, and a periodically varying surface profile formed on at least one of the first and second surfaces of the metal film. The light incident to one surface of the metal film interacts with the surface plasmon mode on at least one surface of the metal film, which enhances transmission of light to at least one aperture in the metal film. The film may have a single aperture or a plurality of periodically arranged apertures. The apparatus is further equipped with a wavelength selective optical filter, spatial optical filter, condenser, proximity scanning optical microscope apparatus, and a mask for photolithography.

COPYRIGHT: (C)2004,JPO



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2004-70288

(P2004-70288A)

(43) 公開日 平成16年3月4日(2004.3.4)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

F I

テーマコード (参考)

G02F 1/01  
G02B 21/00  
G03F 1/08  
H01L 21/027

G02F 1/01 Z  
G02B 21/00  
G03F 1/08 A  
G03F 1/08 D  
H01L 21/30 502P

2H052  
2H079  
2H095  
5F046

審査請求 有 請求項の数 43 O L (全 27 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2003-150755 (P2003-150755)  
(22) 出願日 平成15年5月28日 (2003.5.28)  
(62) 分割の表示 特願平11-229231の分割  
原出願日 平成11年8月13日 (1999.8.13)  
(31) 優先権主張番号 09/208116  
(32) 優先日 平成10年12月9日 (1998.12.9)  
(33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 000004237  
日本電気株式会社  
東京都港区芝五丁目7番1号  
(74) 代理人 100123788  
弁理士 宮崎 昭夫  
(74) 代理人 100088328  
弁理士 金田 暢之  
(74) 代理人 100106297  
弁理士 伊藤 克博  
(74) 代理人 100106138  
弁理士 石橋 政幸

最終頁に続く

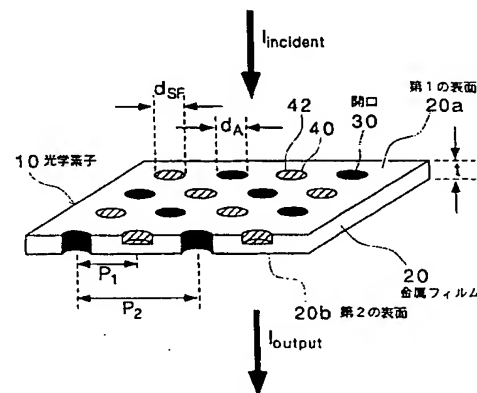
(54) 【発明の名称】 開口部と周期的に変化する表面形状を有する金属フィルムを利用する光伝送装置

## (57) 【要約】

【課題】 強力な光伝送を行う装置を提供する。

【解決手段】 本装置は第1の表面と第2の表面を有する金属フィルムと、金属フィルムに設けられ第1の表面から第2の表面に連通する少なくとも一つの開口と、金属フィルムの第1および第2の表面の少なくとも一つに設けられた周期的に変化する表面形状とを含む。金属フィルムの一つの表面に入射する光が金属フィルムの少なくとも一つの表面上の表面プラズモンモードと相互作用し、これにより金属フィルムの少なくとも一つの開口を通ずる光伝送を強化する。本装置は単一の開口または複数の周期的に配置された開口を持つことができる。本装置はさらに波長選択光学フィルター、空間光学フィルター、集光器、近接走査光学顕微鏡装置、およびフォトリソグラフィーマスクをも備える。

【選択図】 図1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

第 1 および第 2 の表面を有する金属フィルムと、  
前記金属フィルムに設けられ前記第 1 の表面から前記第 2 の表面に連通する少なくとも一つの開口と、  
前記金属フィルムの前記第 1 および前記第 2 の表面の少なくとも一つに設けられた周期的に変化する表面形状とを有し、  
前記金属フィルムの一つの表面に入射する光が前記金属フィルムの少なくとも一つの表面上の表面プラズモンモードと相互作用し、その結果、前記金属フィルムの少なくとも一つの開口を通ずる光伝送を強化することを特徴とする光伝送装置。

10

## 【請求項 2】

第 1 および第 2 の表面を有する金属フィルムと、  
前記金属フィルムに設けられ前記第 1 の表面から前記第 2 の表面に連通する単一の開口と、  
前記金属フィルムの前記第 1 および前記第 2 の表面の少なくとも一つに設けられた周期的に変化する表面形状とを有し、  
前記金属フィルムの一つの表面に入射する光が前記金属フィルムの少なくとも一つの表面上の表面プラズモンモードと相互作用し、その結果前記金属フィルムの前記開口を通る光伝送を強化することを特徴とする光伝送装置。

20

## 【請求項 3】

前記金属フィルムが基板に固定されていることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 に記載する光伝送装置。

## 【請求項 4】

前記周期的に変化する表面形状が複数の表面特殊形状からなることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 に記載する光伝送装置。

## 【請求項 5】

前記表面特殊形状が窪みからなることを特徴とする請求項 4 に記載する光伝送装置。

## 【請求項 6】

前記表面特殊形状が半球形突起部からなることを特徴とする請求項 4 に記載する光伝送装置。

30

## 【請求項 7】

前記表面特殊形状が溝からなることを特徴とする請求項 4 に記載する光伝送装置。

## 【請求項 8】

前記表面特殊形状がリブからなることを特徴とする請求項 4 に記載する光伝送装置。

## 【請求項 9】

前記表面特殊形状が同心の輪状凹みからなることを特徴とする請求項 4 に記載する光伝送装置。

## 【請求項 10】

前記表面特殊形状が同心の輪状隆起からなることを特徴とする請求項 4 に記載する光伝送装置。

40

## 【請求項 11】

前記少なくとも一つの開口が単一の開口からなることを特徴とする請求項 1 に記載する光伝送装置。

## 【請求項 12】

前記少なくとも一つの開口が複数の開口からなることを特徴とする請求項 1 に記載する光伝送装置。

## 【請求項 13】

前記複数の開口が周期的に配置され、前記周期的表面形状が複数の表面特殊形状からなり、前記周期的開口と前記周期的表面特殊形状が配置的に整合し同調していることを特徴とする請求項 12 に記載する光伝送装置。

50

## 【請求項 14】

前記開口が円筒形であることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 に記載する光伝送装置。

## 【請求項 15】

前記開口がスリット状であることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 に記載する光伝送装置。

## 【請求項 16】

前記開口が長方形であることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 に記載する光伝送装置。

## 【請求項 17】

前記周期的表面形状が設けられた前記金属フィルムの表面に光が入射することを特徴とする請求項 1 または請求項 2 に記載する光伝送装置。

## 【請求項 18】

第 1 および第 2 の表面を有する金属フィルムと、  
前記金属フィルムに設けられ前記第 1 の表面から前記第 2 の表面に連通する少なくとも一つの開口と、

前記金属フィルムの前記第 1 および前記第 2 の表面の少なくとも一つに設けられた周期的に変化する表面形状とを有し、前記金属フィルムの一つの表面に入射する光が前記金属フィルムの少なくとも一つの表面上の表面プラズモンモードと相互作用し、その結果前記金属フィルムの少なくとも一つの開口を通ずる光伝送を強化し、さらに特定範囲の波長の光のみが前記金属フィルムの前記開口を通じて伝送されるように入射光線に関する金属フィルムの方位を調整する手段を有することを特徴とする光学フィルター。

## 【請求項 19】

前記少なくとも一つの開口が単一の開口からなることを特徴とする請求項 18 に記載する光学フィルター。

## 【請求項 20】

前記少なくとも一つの開口が複数の開口からなることを特徴とする請求項 18 に記載する光学フィルター。

## 【請求項 21】

前記複数の開口が周期的に配置され、前記周期的表面形状が複数の表面特殊形状からなり、前記周期的開口と前記周期的表面特殊形状が配置的に整合し同調していることを特徴とする請求項 20 に記載する光学フィルター。

## 【請求項 22】

前記周期的表面形状が設けられた前記金属フィルムの表面に光が入射することを特徴とする請求項 18 に記載する光学フィルター。

## 【請求項 23】

第 1 および第 2 の表面を有する金属フィルムと、  
前記金属フィルムに設けられ前記第 1 の表面から前記第 2 の表面に連通する複数の周期的に配置された開口と、

前記金属フィルムの前記第 1 および前記第 2 の表面の少なくとも一つに設けられた周期的に変化する表面形状とを有し、強力伝送が望まれる前記金属フィルムの第 1 位置において周期的表面形状が周期的に配置された開口と同調し、強力伝送が望まれない前記金属フィルムの第 2 位置において周期的表面形状が周期的に配置された開口と同調せず、これにより前記金属フィルムの一つの表面に入射する光が前記金属フィルムの少なくとも一つの表面上の表面プラズモンモードと相互作用し、その結果前記金属フィルムの第 1 の位置において金属フィルムの開口を通ずる光伝送を強化し、前記金属フィルムの第 2 の位置において金属フィルムの開口を通ずる光伝送を強化しないことを特徴とする空間光学フィルター。

## 【請求項 24】

前記周期的表面形状が設けられた前記金属フィルムの表面に光が入射することを特徴とす

10

20

30

40

50

る請求項 23 に記載する空間光学フィルター。

【請求項 25】

特定範囲の波長の光のみが前記金属フィルムの前記開口を通じて伝送されるように入射光線に関する前記金属フィルムの方位を調整する手段をさらに有することを特徴とする請求項 23 に記載する空間光学フィルター。

【請求項 26】

第 1 および第 2 の表面を有する金属フィルムと、

前記金属フィルムに設けられ前記第 1 の表面から前記第 2 の表面に連通する少なくとも一つの開口と、

前記金属フィルムの前記第 1 および前記第 2 の表面の少なくとも一つに設けられた周期的に変化する表面形状とを有し、前記金属フィルムの一つの表面に入射する光が前記金属フィルムの少なくとも一つの表面上の表面プラズモンモードと相互作用し、その結果前記金属フィルムの少なくとも一つの開口を通ずる光伝送を強化し、さらに各開口を通じて移動する光が対応する光ファイバーに入るように各開口と連通して配置された光ファイバーを有することを特徴とする集光装置。 10

【請求項 27】

前記少なくとも一つの開口が単一の開口からなることを特徴とする請求項 26 に記載する集光装置。

【請求項 28】

前記少なくとも一つの開口が複数の開口からなることを特徴とする請求項 26 に記載する集光装置。 20

【請求項 29】

前記複数の開口が周期的に配置され、前記周期的表面形状が複数の表面特殊形状からなり、前記周期的開口と前記周期的表面特殊形状が配置的に整合し同調していることを特徴とする請求項 28 に記載する集光装置。

【請求項 30】

前記周期的表面形状が設けられた前記金属フィルムの表面に光が入射することを特徴とする請求項 26 に記載する集光装置。

【請求項 31】

光源と光検出器を有する近接走査光学顕微鏡の集光モードで使用する近接走査光学顕微鏡装置であって、 30

光源から受光するために前面が光源の近くに配置された光伝送装置と、

前記光伝送装置の正面部の前面に第 1 の表面が固定され第 2 の表面が光源と向き合って光伝送装置の正面部に配置された金属フィルムと、

前記金属フィルムに設けられ前記第 1 の表面から前記第 2 の表面に連通する少なくとも一つの開口と、

前記金属フィルムの前記第 1 および前記第 2 の表面の少なくとも一つに設けられた周期的に変化する表面形状とを有し、

これにより前記金属フィルムの前記第 2 の表面に入射する光源からの光が前記金属フィルムの少なくとも一つの表面上の表面プラズモンモードと相互作用し、その結果前記金属フィルムの少なくとも一つの開口を通ずる光伝送を強化し、強化された伝送光が前記光伝送装置を通じて前記光検出器に伝送されることを特徴とする近接走査光学顕微鏡装置。 40

【請求項 32】

光源と光検出器を有する近接走査光学顕微鏡の放射モードで使用する近接走査光学顕微鏡装置が、

光を前記光検出器に伝送するために前面が前記光検出器の近くに配置された光伝送装置と、

前記光伝送装置の正面部の前面に第 1 の表面が固定され第 2 の表面が前記光検出器と向き合った状態で前記光伝送装置の正面部に配置された金属フィルムと、前記金属フィルムに設けられ前記第 1 の表面から前記第 2 の表面に連通する少なくとも一つの開口と、 50

前記金属フィルムの前記第 1 および前記第 2 の表面の少なくとも一つに設けられた周期的に変化する表面形状とを有し、これにより光源からの光が前記光伝送装置を通じて前面に伝送され前記金属フィルムの前記第 1 の表面に入射し、前記金属フィルムの少なくとも一つの表面上の表面プラズモンモードと相互作用し、その結果前記金属フィルムの少なくとも一つの開口を通ずる光伝送を強化し、強化された伝送光が前記光検出器に伝送されることを特徴とする近接走査光学顕微鏡装置。

【請求項 3 3】

前記少なくとも一つの開口が単一の開口からなることを特徴とする請求項 3 1 または請求項 3 2 に記載する近接走査光学顕微鏡装置。

【請求項 3 4】

前記少なくとも一つの開口が複数の開口からなることを特徴とする請求項 3 1 または請求項 3 2 に記載する近接走査光学顕微鏡装置。

【請求項 3 5】

前記複数の開口が周期的に配置され、前記周期的表面形状が複数の表面特殊形状からなり、前記周期的開口と前記周期的表面特殊形状が配置的に整合し同調していることを特徴とする請求項 3 4 に記載する近接走査光学顕微鏡装置。

【請求項 3 6】

前記複数の開口が周期的に配置され、前記周期的表面形状が複数の表面特殊形状からなり、前記周期的開口と前記周期的表面特殊形状が配置的に整合し同調しており、前記金属フィルムの第 2 の表面上に周期的表面形状が設けられていることを特徴とする請求項 3 1 に記載する近接走査光学顕微鏡装置。

【請求項 3 7】

前記複数の開口が周期的に配置され、前記周期的表面形状が複数の表面特殊形状からなり、前記周期的開口と前記周期的表面特殊形状が配置的に整合し同調しており、前記金属フィルムの前記第 1 の表面上に周期的表面形状が設けられていることを特徴とする請求項 3 2 に記載する近接走査光学顕微鏡装置。

【請求項 3 8】

感光性耐蝕膜を被覆した基板に画像を転写するフォトリソグラフィーマスクであって、第 1 および第 2 の表面を有する金属フィルムと、前記金属フィルムに設けられ前記第 1 の表面から前記第 2 の表面に連通し、転写する画像に対応するパターンに配置された少なくとも一つの開口と、前記金属フィルムの前記第 1 および前記第 2 の表面の少なくとも一つに設けられた周期的に変化する表面形状とを有し、これにより前記金属フィルムの一つの表面に入射する光が前記金属フィルムの少なくとも一つの表面上の表面プラズモンモードと相互作用し、その結果金属フィルム内のパターンに準拠して感光性耐蝕膜被覆基板を露出するように前記金属フィルムの少なくとも一つの開口を通ずる光伝送を強化し、画像を転写することを特徴とするフォトリソグラフィーマスク。

【請求項 3 9】

前記少なくとも一つの開口が単一の開口からなることを特徴とする請求項 3 8 に記載するフォトリソグラフィーマスク。

【請求項 4 0】

前記少なくとも一つの開口が複数の開口からなることを特徴とする請求項 3 8 に記載するフォトリソグラフィーマスク。

【請求項 4 1】

前記複数の開口が周期的に配置され、前記周期的表面形状が複数の表面特殊形状からなり、前記周期的開口と前記周期的表面特殊形状が配置的に整合し同調していることを特徴とする請求項 4 0 に記載するフォトリソグラフィーマスク。

【請求項 4 2】

前記開口がスリット状であることを特徴とする請求項 3 8 に記載するフォトリソグラフィ

10

20

30

40

50

ーマスク。

【請求項43】

周期的表面形状が設けられた金属フィルムの表面に光が入射することを特徴とする請求項38に記載するフォトリソグラフィーマスク。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は光学分野に関し、特に周期的に変化する表面形状を有するとともに一つ以上の開口が設けられた薄い金属フィルムを通じて行う光の伝送技術に関する。

【0002】

【従来の技術】

自らの光学的浸透厚（入射光による電磁界が、電界強度が  $1/e^2$  に低下するまで材料中に進入する深さ、金属に対しては一般的に20nmから30nm）より厚い平滑な金属フィルムは、バルクプラズマ振動数  $\omega_p$  より低い振動数の光に対して不透明である。バルクプラズマ振動数  $\omega_p$  は  $\omega_p^2 = (4\pi ne^2)/m^*$  で与えられ、ここに  $n$  は電子密度、 $e$  は電荷、 $m^*$  は実効質量である。かかる金属フィルム内の単一開口を通ずる光の伝送効率は開口の直径に依存する。もし開口直径が開口を通過する光の波長より小さければ、透過率は  $(d/\lambda)^4$  に比例する。（参照：H. A. Bethe, “小径孔による回折の理論 (Theory of Diffraction by Small Holes)” Physical Review, 第2シリーズ, 巻66, 第7, 8号, 頁163-182 (1944)）。このため、近距離光学装置の光学的処理量は非常に小さい。

【0003】

近年、光波長未満の径の開口列を有する金属フィルムを使用して、著しく高められた光伝送技術が開示された。

【0004】

参照：T. W. Ebbesen 他, “波長未満口径の孔列による驚くべき光伝送成果 (Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays)”, Nature, 巻391, 頁667-669, (2月12日, 1998年) ;  
参照：米国特許出願番号 08/979, 432, T. W. Ebbesen 他, 提出 11月 26日, 1997年 および 米国特許仮出願、出願番号 60/051, 904, T. W. Ebbesen 他, 提出 7月 8日, 1997年,  
参考として両者共本明細書に記載。1000倍程のこの強化は、金属フィルムに入射する光が表面プラズモンモードと共振的に相互作用する時に生ずる。表面プラズモンモード（以下単にプラズモンと称する）は金属と隣接する誘電性媒体との界面に存在する集合的な電氣的励起状態である。

【0005】

参照：H. Raether, “平滑および粗な平面および格子上における表面プラズモン (Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings)”, 巻3, Springer Tracts in Modern Physics (Springer 出版社, ベルリン, 1988) ;

A. D. Boardman (ed.), “電磁的表面モード (Electromagnetic Surface Modes)”, 章1, 17, 頁1-77, 661-725 (John Wiley & Sons, 1982)。

開口列が周期的に配置された構造は表面プラズモンモードと入射光線の結合（共振的相互作用）を可能とする。

【0006】

他方で、開口の周期的配列はまたWoodの異常の存在を含み回折格子に似た性質を有する（参照：上記Ebbesen 他）。

10

20

30

40

50

## 【0007】

(参照：R. W. Wood, “回折格子スペクトルにおける光の不均一分布の異常例について (On a Remarkable Case of Uneven Distribution of Light in a Diffraction Grating Spectrum)” *Philosophical Magazine*, 巻4, 頁396-402, (1902)) および R. W. Wood, “変則的回折格子 (Anomalous Diffraction Gratings)” *Physical Review*, 巻48, 頁928-936 (1935))。

## 【0008】

Woodの異常は高次の回折光線が金属フィルムに接線方向になる時、0次の伝送において強く鋭い最小値を発生させる。これら二つの効果（表面プラズモン結合とWoodの異常）が組み合わさると、0次の伝送スペクトルに明確な最大値と最小値が発生する。これらの最大値と最小値は、開口配列と入射光線配置の両者の幾何学的配列と隣接する誘電媒体の屈折率で定まる波長の位置に生ずる。

## 【0009】

参照：上記Ebbesen 他 および H. F. Ghaemi 他, “表面プラズモンは波長未満径の孔を通ずる光伝送を強化する (Surface plasmons enhance optical transmission through subwavelength holes)”, *Physical Review B*, 巻58, 第11号, 頁6779-9782 (9月15日, 1998年)。

## 【0010】

この性質を利用する光伝送制御装置が開発された。

## 【0011】

参照：米国特許出願番号 09/168, 265, T. J. Kim 他, 提出10月 08日, 1998年, 参考として本明細書に記載。

## 【0012】

従来の開口配列付き装置においては、開口配列は光を伝送する開口としてのみ特徴付けられていた。しかしある種の光伝送用途（例えば、近接光学顕微鏡検査等）においては、開口列に示されるような高次伝送を、単一の開口、または、小さなセットの開口により実現することが望まれる。また、開口列の伝送をさらに増加することも望ましいことである。しかし今日までこのような強力な伝送は実現されなかった。

## 【0013】

## 【発明が解決しようとする課題】

本発明は、金属フィルムに周期的な表面形状を与え入射光線と強力に結合するようにした光伝送装置を提供することでこの問題を克服するものであり、用途に応じて金属フィルムに比較的小さな開口列を開け、または単一の孔を開けることもできる。

## 【0014】

さらに、本発明は一般的光学素子を利用して、新式の走査型近接場顕微鏡、光波長未満のフォトリソグラフィーマスクの新技术、波長選択フィルター、および集光装置にその適用を広げている。

## 【0015】

## 【課題を解決するための手段】

一般的に言って、本発明に準拠して光学素子が得られる。この装置は第1および第2の表面を有する金属フィルムと、金属フィルムに設けられ第1の表面から第2の表面に連通する少なくとも一つの開口と、金属フィルムの第1および第2の表面の少なくとも一つに設けられた周期的に変化する表面形状とを有する。

## 【0016】

金属フィルムの一つの表面に入射する光が金属フィルムの少なくとも一つの表面上の表面プラズモンモードと相互作用し、これにより金属フィルムの少なくとも一つの開口を通ずる光伝送を強化する。本装置は単一の開口を備えてもまたは周期的配列格子に配列した

10

20

30

40

50



複数の開口を備えても良い。

【0017】

上述のように、本発明の光学素子は周期的な表面形状を有する少なくとも一つの表面を含む金属フィルム有している。周期的な表面形状は、金属フィルム表面に周期的に配置された突起または凹み等の表面特殊形状を含んでいる。周期的な表面形状により金属表面プラズモンモードが入射光と強力に結合できる。それにより金属フィルムの開口は、周期的な表面形状の周期と格子規則性に関連して光波長の強力伝送を行う。周期的表面形状が無い場合の同じ大きさ、数の開口を通じる伝送に比べて、強力光伝送の度合いが遥かに大きい。これは金属フィルムの表面プラズモンの活発な参加によるものである。

【0018】

以前そうであったように、もし光波長未満の口径の開口が単なる幾何学的な開口であったら、伝送効率（伝送された強度（エネルギーの強さ）を開口に入る光強度で除したものと定義する）は非常に小さい（例えば、開口直径：波長の比が約0.1であれば約 $2 \times 10^{-3}$ ）。しかし本発明においては、下記のように伝送効率が大きく増大されその結果得られる装置は、周期的な表面形状からなる表面特殊形状の周期性と規則性を調整することにより、光の伝送性質を適応させる能力が付加された高能率サブ波長光源と考えられる。

【0019】

この結果の実際効果として、本発明の一般的光学素子は波長選択光学フィルター（特に紫外線、可視光線、近赤外線波長用）、空間光学フィルター、集光器、走査型近接場光学顕微鏡装置およびフォトリソグラフィーマスクとして応用できる。このすべては本明細書に記載され本発明に含まれている。

【0020】

したがって本発明の目的は、ただ開口のみを通じた場合に比べて強力な伝送を行うため、周期的な表面形状を利用し一つ以上の開口を通じて強力な光伝送を行う装置を提供することである。

【0021】

本発明の他の目的は、単一の開口を通じて強力な光伝送を行う装置を提供することである。

【0022】

本発明の更なる目的は、一つ以上の開口を通じて選択した波長で強力な光伝送を行う装置を提供することである。

【0023】

本発明の尚更なる目的は、一つ以上の開口を有し強力な光伝送を行う波長選択光学装置を提供することである。

【0024】

本発明の尚更なる目的は、強力な光伝送を行う空間光学フィルターを提供することである。

【0025】

本発明の尚更なる目的は、一つ以上の開口を有し強力な光伝送を行う集光装置を提供することである。

【0026】

本発明の尚更なる目的は、一つ以上の開口を有し強力な光伝送を行う走査型近接場光学顕微鏡装置を提供することである。

【0027】

本発明の尚更なる目的は、一つ以上の開口を有し、強力な光伝送を行うフォトリソグラフィーマスクを提供することである。

【0028】

本発明の他の目的は添付の図面と共に下記記述を参照することによりさらに容易に明らかとなるであろう。

10

20

30

40

50

【0029】

【発明の実施の形態】

次に、本発明の実施例について図面を参照して説明する。

【0030】

図面を参照すると、図1ないし図5のそれぞれは、本発明による光学素子10の幾つかの実施例を示す図である（縮尺は一定ではない）。

【0031】

一般的に、光学素子10は第1の表面20aと第2の表面20bを含む薄い金属板すなわち薄い金属フィルム20を有している。金属フィルム20は少なくとも一つの孔、すなわち、開口30を有し、金属フィルム20の表面20a、20bの少なくとも一つが下記のように周期的な表面形状を含んでいる。 10

【0032】

本発明の特定の実施例を説明する前に本発明を理解するため重要な幾つかの条件について詳述することが有益であろう。

【0033】

金属フィルム20は金属フィルムまたは金属板からなる構成である。金属フィルム20を構成する材料は、すべての金属またはドーブ処理をした半導体のように導伝性材料で、アルミニウム、銀、金あるいはクロームが好ましい。

【0034】

周期的な表面形状を含む表面とは、ほぼ平滑な表面とは反対に隆起した、および、若しくは、沈下した領域を示す総ての表面で、これらの領域は周期性または規則的反復パターン（例えば規則的な二次元格子）で配列されている。例えば、周期的な表面形状を示す表面には下記のものが含まれるが、これに限定されることはない。 20

【0035】

（1）複数の円筒形または半球径凹型へこみ（窪み）を備え、窪みが表面上に周期的に配列されている表面；

（2）複数の円筒形または半球径突起を備え、半球径突起が表面上に周期的に配列されている表面；

（3）複数の曲線状または直線状の凹型溝を備え、溝が表面上に周期的パターンで配列されている表面； 30

（4）複数の曲線状または直線状の隆起したリブを備え、リブが表面上に周期的パターンで配列されている表面；

（5）複数の沈下したまたは隆起した輪状部を備え、輪状部が表面上に周期的パターンで（例えば同心的に）配列されている表面；

（6）上記の如何なる組合わせにもよる表面。一般に周期的な表面形状は金属フィルム20に設けられる開口30を含まないが、希望により複数のかかる開口を周期的パターンで設けることができる。

【0036】

金属フィルム20表面の金属フィルム20の全厚みを貫通する開口30と、それが無ければ金属フィルム20が開口30を除いて名目上平滑となる突起や凹みを識別するため、金属フィルム30の全厚みを貫通せず、それゆえ開口では無い表面の突起、または、凹みを述べるのに表面特殊形状なる用語を使用する。例えば、窪み、半球径突起物、溝、輪状物、リブは表面特殊形状である。表面特殊形状は如何なる希望の形にも形成できる。尚、本発明の意図は表面特殊形状の如何なる特定寸法によっても限定されないが、然し表面特殊形状の幅、または直径 $d_{SF}$ 、すなわち、周期性方向における表面特殊形状の寸法は、表面特殊形状の周期 $P$ より小さく作られるのが好ましい。さらに、表面特殊形状の周期 $P$ に金属フィルム20に隣接する媒体の屈折率 $n_d$ を乗じた値もまた、金属フィルム20を通じて伝送する光の最大波長 $\lambda$ より小さく（最適にはほんの僅か小さく）作られるのが好ましい。すなわち、 $d_{SF}$ 、 $P$ 、 $n_d$ 、 $\lambda$ 間の好ましい関係は、  
 $d_{SF} < P$ 、および、 $n_d P < \lambda$  40

である。ただし、上記の関係は本発明を制限するものではない。ここで、二つの異なる媒体が金属フィルムの二つの表面に隣接している場合、 $n_d$ が二つの媒体の屈折率の小さい方に等しいことが好ましい。また、複数、すなわち、少なくとも二つ以上の周期的表面特殊形状がある限り、本発明が有効であることも注目すべきである。実際、本発明は最少二つの周期的表面特殊形状があれば有効である。

#### 【0037】

図1は本発明による光学素子の一実施例を説明するための斜視図である。図1に示す光学素子10は、各々周期的表面特殊形状を含む第1の表面20aと第2の表面20bを持つ金属フィルム20を有している。第1の表面20aと第2の表面20bの平面図をそれぞれ図2と図3に示す。

#### 【0038】

図2に示すように、第1の表面20aは正方配列された開口30と窪み42からなる表面特殊形状40をそれぞれ含み、窪み42の列は周期 $P_1$ を有する。窪みは図示するように直径 $d_{sf}$ を有する。

#### 【0039】

図3に示すように第2の表面20bは、金属フィルム20の全厚を突き出る開口30の列を含み、列の周期は $P_2$ である。図2および図3の比較から解るように第1の表面20aの周期的表面形状の周期は $P_1$ であり、これは第1および第2の両表面20a、20b上に周期的に配列した開口列の周期 $P_2$ の $1/2$ である。なお、図2および図3に示される周期 $P_2:P_1$ の特定比 $2:1$ は単に例示のためのもので本発明に必ずしも必要な値ではない。

#### 【0040】

図1の上部に矢印で記号表示された $I_{incident}$ の強度を有する入射光は、金属フィルム20の第1表面20aに向かい、金属フィルム20の第2表面20b内の開口30から増大された強度 $I_{output}$ を有する図1の下部に矢印で記号表示された出力光として伝送される。

#### 【0041】

光がこの構造を通して反対方向に移動した場合、すなわち、もし光が第2表面20bに入射し周期的な表面形状を有する第1表面から出力光として伝送された場合にも伝送強度の増大が起こることに注目すべきである。しかしこのような形状では伝送強度は大きく増大しない。したがって、伝送強度を最大に高めるためには、光が周期的な表面形状を有する表面に入射することが好ましい。

#### 【0042】

図1に示されるように、開口30の直径は $d_A$ で表わされる。伝送強度を最大限増強して最高解像度を得るために開口30の直径は、開口30上への入射光の波長より小さいことが好ましい。すなわち、開口は波長未満（サブ波長）の直径を持つことが好ましい。

#### 【0043】

金属フィルム20の厚みは $t$ で表示され、金属フィルム20の光浸透厚より大きくなければならない。すなわち、金属フィルムは光学的に不透明であるように十分厚くなければならないが、開口直径 $d_A$ の約0.05乃至10倍の範囲にあることが好ましい。

#### 【0044】

図1ないし図3に示した実施例には、支持されていない薄い金属板20が示されている。すなわち、金属板20は支持構造に隣接または固着されていない。しかし本発明では、金属フィルムをガラスまたは石英上に堆積させ、薄い金属フィルム20を基板に固定してもよい。例えば、厚さ $t=0.2\mu m$ の銀フィルムを蒸着法により、溶融石英、または、ガラス基板上に堆積させることが可能である。

#### 【0045】

基板を使用する時には、露出（空気）表面か金属フィルム－基板の界面にある表面上のいずれかに周期的表面を設けることができる。金属フィルム－基板の界面にある金属表面上に周期的な表面形状を設ける場合には、例えばパターンの陰画を基板表面上に作り、陰画

10

20

30

40

50

パターンを形成した基板上に金属フィルムを堆積させることにより、金属フィルム上に表面特殊形状を設けることができる。

【0046】

さらに、図1ないし図3に示した実施例の開口30および窪み42は、円形または円筒形であるが、本発明の範囲から逸脱することなく、これらの特異形状を他の形、例えば楕円形、長方形、またはスリット型にすることができる。

【0047】

表面特殊形状40は実際には上記のように、表面特殊形状の幅または径 $d_{sf}$ が表面特殊形状の周期より小さい限り、相応する表面内に如何なる寸法、または、形の突起および若しくは凹みを含むことができる。

10

【0048】

さらに、図1ないし図3に示した実施例の周期的配列は正方配列であるが、本発明の教義から逸脱することなく、開口および表面特殊形状について、例えば三角形のような他の二次元の周期的配列形態も可能である。

【0049】

図4および図5のそれぞれは、本発明による光学素子の他の典型的な実施例の第1の表面20aおよび第2の表面20bの構造を示す平面図である。

【0050】

本実施例において金属フィルム20は単一の開口30を有する。第1の表面20aには単一の開口30と図1ないし図3に示した実施例と同じ窪み42を複数含む表面特殊形状40が形成されている。窪み42は図示されるように直径 $d_{sf}$ を有し、周期 $P_1$ で周期的に配置されている。

20

【0051】

第2の表面20bには単一の開口30のみが形成されている。第1の表面20aに向けて光が入射すると、増加強度を有する出力光が第2の表面20bの開口30から伝送される。

【0052】

図6および図7のそれぞれは、本発明の光学素子のさらに他の典型的な実施例の第1の表面20aおよび第2の表面20bの構造を示す平面図である。

【0053】

本実施例においても金属フィルム20は単一の開口30を有する。第1の表面20aには単一の開口30と凹んだ溝44を含む表面特殊形状40が形成されている。溝44は図示されるように寸法 $d_{sf}$ の周期性方向に幅を有し、周期 $P_1$ の周期的なパターンで、同一の外延を有し互いに平行に配置されている。

30

【0054】

第2の表面20bには単一の開口30のみが形成されている。第1の表面20aに向けて光が入射すると、増加強度を有する出力光が第2表面20bの開口30から伝送される。

【0055】

図8および図9のそれぞれは、本発明の光学素子のさらに他の典型的な実施例の第1の表面20aおよび第2の表面20bの構造を示す平面図である。

40

【0056】

本実施例においても金属フィルム20は単一の開口30を有する。第1の表面20aには単一の開口30と凹んだ溝46を含む表面特殊形状40が形成されている。溝46は図示するように周期性方向に寸法 $d_{sf}$ の幅を有し、周期 $P_1$ の周期的パターンで、二組の平行溝が互いに直交して配置されている。本実施例における溝46は図6に示した溝44より幅が狭く表示されているが、このことは必ずしも必要ではない。また、溝46は水平方向と垂直方向とが同じ幅で表示されているが、これもまたその通りでなくても良い。二組の平行溝もまた直交する必要はなく、代わりに他の角度で交差することができる。さらに、溝の間隔も二組の平行溝間で同じである必要は無い。さらに、三組み以上の溝が交差するようにしても良い。第2の表面20bには単一の開口30のみが形成されている。第1

50

の表面 20a に向けて光が入射すると、強度が増大された出力光が第 2 表面 20b の開口 30 から伝送される。

【0057】

図 10 および図 11 のそれぞれは、本発明の光学素子のさらに他の典型的な実施例の第 1 の表面 20a および第 2 の表面 20b の構造を示す平面図である。

【0058】

本実施例においても金属フィルム 20 は単一の開口 30 を有する。第 1 の表面 20a には単一の開口 30 と凹んだ同心の輪状溝 48 を含む表面特殊形状 40 が形成されている。図 1 ないし図 9 に示した各実施例が (x, y) 方向の周期性を有するものであるのに対し、本実施例は、各実施例とは対照的に半径方向の周期性を有している。輪状溝 48 は図示するように周期性方向に寸法  $d_{sf}$  の幅を有し、周期  $P_1$  の周期的パターンで、すなわち、半径が周期的に増大する同心的に配置されている。

10

【0059】

第 2 の表面 20b には単一の開口 30 のみが形成されている。第 1 の表面 20a に向けて光が入射すると、増加強度を有する出力光が第 2 表面 20b の開口 30 から伝送される。

【0060】

図 1 ないし図 11 に示した各実施例には凹んだ表面特殊形状、例えば、窪み、溝、および輪状溝が示されている。本発明は、上記のように隆起した表面特殊形状を含んでおり、図 1 ないし図 11 に示す周期的配置の表面特殊形状、例えば、隆起した、突起、リブおよび輪状物を代用的に備えることができる。

20

【0061】

図 1 ないし図 5、図 8 および図 9 に記載される表面を、下記に示すように実験的に組み立てられた。石英基板上に厚さ 300 nm の銀の金属フィルムを熱蒸着させた。銀のフィルムは光学的に不透明である。ついで金属フィルム内に集中イオンビーム機ミクリオン (Micrion) 9500 (50 keV ガリウムイオン、5 nm 称呼径) を使用して開口と表面特殊形状が組み立てられた。個々の開口の直径  $d_A$  と表面特殊形状の寸法  $d_{sf}$  (窪みの直径または溝の幅等) を個々の異なる試料について 100 nm から 600 nm の間で変動させた。また、表面形状の周期  $P_1$  を 0.4  $\mu\text{m}$  から 2  $\mu\text{m}$  の間で変動させた。

【0062】

装置の動作を解析するため、下記のように 0 次の伝送画像とスペクトルを記録した。また遠距離伝送結像顕微鏡 (Nikon TE 2000) を使用して単一の画像およびスペクトルを得た。画像は分光計 (ISA Triax 320) の入り口スリットに結像され、液体窒素冷却された電荷結合素子 (CCD Princeton Instruments) カメラにより検出した。結像目的のために分光計の回折格子を鏡に置き換え、画像を CCD 上に投影した。水平軸に沿った単一開口、または、開口列の空間的隔離は分光計の入り口スリットを使用して行った。

30

【0063】

本発明の動作の理解を高めるため、本発明が提供する強力光伝送を産出する周期的な表面形状と一つ以上の開口が設けられた金属フィルムを通じて、強力光伝送が発生する物理的原理について述べる。

40

【0064】

上記のように、周期的な開口列が開けられた平滑な表面を有する金属フィルムは、明瞭なピークと強く増大された伝送効率を表す明確な 0 次伝送スペクトルを表示する。これらの最大値は入射光線と金属フィルムの両表面 20a と 20b 上の表面プラズモンとの共振相互作用の結果生ずる。参照：上記 Ghamei 他。

【0065】

図 12 は本発明による装置の、金属フィルム内における入射および出射光線の関連配置とその表面プラズモンとの結合状態を示す図である。本発明に準拠して作られた光学素子 10 を入射光線波長ベクトル  $k_{inc}$  および出射光線波長ベクトル  $k_{out}$  と共に示す。波長ベクトル  $k_{inc}$  は光学素子 10 の表面への垂線 N に対し  $\theta$  の角度で光学素子 10 に入

50

射する。波長ベクトル  $k_{out}$  は波長ベクトル  $k_{inc}$  に平行である。波長ベクトル  $k_x$  は光学素子 10 の表面の平面内にある波長ベクトル  $k_{inc}$  の成分である。

【0066】

入射光が p 偏光、すなわち、入射電界が x 軸に平行で孔明き金属フィルムユニットが y 軸の回りに角度  $\theta$  だけ回転している場合には、周期的な表面形状、または、開口の周期的配列、または、両者の結合等周期的構造を持つ金属フィルム上の表面プラズモンと入射光との結合は以下に示す運動量保存の法則に従う。（参照：上記 H. Raether）。

【0067】

【数 1】

$$\vec{\kappa}_{sp} = \vec{\kappa}_x + i\vec{G}_x + j\vec{G}_y \quad (1)$$

10

ここに

【0068】

【数 2】

$$\vec{\kappa}_{sp}$$

は表面プラズモンベクトル；

【0069】

【数 3】

$$\vec{\kappa}_x = \hat{x}(2\pi/\lambda)\sin\theta$$

20

は図 12 に示す金属フィルムの平面内にある入射光線  $k_{inc}$  の波長ベクトルの成分；

【0070】

【数 4】

$$\vec{G}_x \text{ および } \vec{G}_y$$

30

は表面構造の周期格子例えば、

【0071】

【数 5】

$$\vec{G}_x = \vec{G}_y = (2\pi/P)$$

である正方格子に相当する逆格子ベクトルである。ここに P は表面特殊形状の周期であり、 $\theta$  は図 12 に示すような入射波長ベクトル  $k_{inc}$  と金属フィルムの表面垂線 N 間の角度、 $i, j$  は整数である。ベクトル

【0072】

【数 6】

$$\vec{\kappa}_{sp}$$

40

の量は下記分散関係式から得られる。（参照：上記 H. Raether）

【0073】

【数 7】

$$|\vec{\kappa}_{sp}| = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} \quad (2)$$

50

ここに  $\omega$  は入射光線の角振動数、 $\varepsilon_m$  と  $\varepsilon_d$  はそれぞれ金属と誘電媒体の誘電率である。今  $\varepsilon_m < 0$ 、および、 $|\varepsilon_m| > \varepsilon_d$  と仮定する。これはバルクプラズモンエネルギー以下の金属とドーピング処理をした半導体に対する場合である。参照：上記 H. Reather; M. Ordal 他 "赤外線領域および遠赤外線領域における Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti および W 等金属の光学的性質 (Optical Properties of the Metals, Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti and W in the infrared and far infrared)", Applied Optics, 巻22, 第7号, 頁1099-1119 (4月1日1983年)。

10

【0074】

伝送強度を  $E$  および  $k_x$  の関数としてグレースケール上に描くと、得られるエネルギー運動量 ( $E, k_x$ ) 線図 (分散線図として知られる) は一組の高伝送帯を示し、この高伝送帯セットは (2) 式で与えられる表面プラズモン分散を再生する。伝送スペクトルは、金属フィルムに実際に隣接する媒体がたとえ著しく異なる種類のものであっても、孔明き金属フィルムのどちら側が照らされるかには無関係である。

【0075】

これらの結果を図13および図14に示す。図13および図14のそれぞれは、孔列を有するが周期的な表面形状を持たない金属フィルム、および、孔列を有し周期的な表面形状を持つ金属フィルムのそれぞれに対して、入射角  $\theta$  の関数として伝送スペクトルを表した線図である。特に、図14に示すデータを作成するのに使用する構造は周期的配列の窪みを有し、図1および2に示す実施例構造と同じである。どちらの場合も金属フィルムは石英基板上に堆積させた約300nm厚の銀フィルムで、開口の直径は約200nmである。図14に示される金属フィルムの場合には、窪みの直径も約200nmである。開口だけの周期は  $P = 2.0 \mu m$  で窪みの周期は  $P = 0.5 \mu m$  である。

20

【0076】

伝送スペクトルの最小値は、回折光線が回折格子に対して接線方向に作用した時に回折格子に現れる Wood の異常の結果と同定される。参照：上記 H. F. Ghaemi 他, 上記 R. W. Wood.

Wood の異常の発生条件は、

30

【0077】

【数8】

$$\vec{k}_{sp}$$

が擦過光 (格子に対し接線方向) の波長ベクトルで置換される以外は式 (1)、(2) と同じである。擦過光ベクトルは、

【0078】

【数9】

$$k_{diff} = [2\pi n_d / \lambda] \text{ で与えられ、 } n_d = \sqrt{\varepsilon_d}$$

40

は支持層の屈折率である。高次配列に対しては Wood の異常最小値の幅を非常に小さくでき、普通は分光計の解像度で限定されることが分かっている。

【0079】

Wood は、高品質な回折格子においては 0.6 nm の波長解像度を用いてこの効果により二つの主ナトリウム線を分離できるという事実を述べた。本発明の光学フィルターは下記に述べるように、金属フィルムに対する入射光線の角度  $\theta$  をごくわずかに変動させて高いコントラストで伝送強度を変調することにより、この現象を利用する。

【0080】

50

Woodの異常の発生が幾何学的形状に依存することにより、 $(E, k_x)$  線図の表面プラズモン分枝の分散に密接に関係する最小値の組合わせが得られる。分散曲線の大部分は限定された勾配で $(E, k_x)$  平面を通過するから、一定の光子エネルギー $E$  (或は一定の波長) に対して伝送強度は入射角 $\theta$ が変動するにつれて最大値、最小値を行き来する。したがって、入射角 $\theta$ を変動させて、伝送光の波長または振幅を制御できる。波長または振幅を制御できる。

【0081】

逆に、 $E$  (または $\lambda$ ) が変動すると、伝送光エネルギーは一定の入射角 $\theta$ に対して最小値、最大値を示す。金属フィルムに対して光線が垂直に入射 (すなわち、 $\theta = 0$ ) すると、波長の最大値は式(1)と(2)を組み合わせた以下の式により得られる。

【0082】

【数10】

$$\lambda_{\max} = \frac{P}{\sqrt{i^2 + j^2}} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} \quad (3)$$

同様に最小値は以下の式により得られる。

【0083】

【数11】

$$\lambda_{\min} = \frac{P}{\sqrt{i^2 + j^2}} \sqrt{\epsilon_d} \quad (4)$$

配列の各平面に対して伝送スペクトルの中に一組の最大値、最小値が存在する。例えば、もし金属フィルムに接する媒体が一表面が空気で反対側が石英であれば、各表面に対する伝送スペクトル内の最大値と最小値は石英と空気間の屈折率の相違で互いに識別できる。参照：上記Ebbesen他および上記Ghaemi他。

もし金属フィルムの表面が周期的な窪み、もしくは、隆起により構成されていれば、すなわち、表面が周期的な表面形状を備えていれば、例え開口だけしか持たない前述の装置より金属フィルムの開口が相対的に少なくても、金属フィルムはなお明確な表面プラズモン共鳴を有することを発明者等は発見した。このことは図15で図解的に説明されている。

【0084】

図15は、一方は開口のみを備え、他方は表面特殊形状並びに開口を図2および図3に示した金属フィルムの一表面上に備えた二つの金属フィルムの典型的な0次伝送スペクトルを比較して示す図である。

【0085】

金属フィルムは厚さ約300nmの銀フィルムである。各金属フィルムにおいて、一表面は石英基板に隣接し、他の表面は空気に露出している。

【0086】

破線により示される第1の金属フィルムにおいては、正方配列の開口のみが設けられ、空気側と石英側の両方において配列の周期 $P$ は1 $\mu\text{m}$ である ( $P$  (空気側表面) =  $P$  (石英側表面) = 1 $\mu\text{m}$ )。

【0087】

実線により示される第2の金属フィルムにおいては、正方配列の開口と、凹み、すなわち窪みが空気側表面に周期 $P = 0.5\mu\text{m}$ で設けられ、対応する開口のみの正方配列が石英側表面に周期 $P$  (石英側表面) = 1 $\mu\text{m}$ で設けられている。開口および窪みの直径は約200nmである。図15においてピーク点の表示は式(3)、(4)で定めたように、( $i, j$ )の組合わせが使用され、また、文字Aが空気側表面を、文字Gが石英(ガラス)

10

20

30

40

50



側表面を表し、周期はミクロン単位で表示している。

#### 【0088】

図15において、開口と窪みの場合は $P$ （空気側表面）＝ $1\mu\text{m}$ （ $A1.0\mu\text{m}$ と表示）に相当するピークが開口のみの場合に比べて消滅しており、また、 $P$ （空気側表面）＝ $0.5\mu\text{m}$ の時の伝送ピーク（ $(1, 0) A0.5\mu\text{m}$ と表示）がさらに著しく強いことが解る。この理由は、窪みがあると空気－金属表面は $P=0.5\mu\text{m}$ の凹み（開口または窪み）の正方配列を持つことによる。さらに、列を構成していない単独の開口に比べて既に強化されている開口列のみの場合の伝送は、入射光が窪みと関連して表面プラズモンモードと共振するときには、さらに一層激しく強化される。このことは、図13および図16（A）にその特性が示される表面特殊形状が設けられていない孔開き金属フィルムと、図14および図16（B）にその特性が示される窪みが形成された表面特殊形状付きの孔開き金属フィルムを比較する、図16（A）および図16（B）の（ $E, k_x$ ）分散線図、並びに、図13および図14から明らかである。

（A）は、開口の列が明いた金属フィルムを通して行う光の伝送を、光子エネルギー  $E = hc/\lambda$ 、および  $k_x = k_{inc} \sin \theta$  の関数としてグレースケールで表示するグラフで、金属フィルムの二つの表面がいずれも周期的表面形状を含まない場合である。（B）は、開口の列が明いた金属フィルムを通して行う光の伝送を、光子エネルギー  $E = hc/\lambda$ 、および  $k_x = k_{inc} \sin \theta$  の関数としてグレースケールで表示するグラフで、金属フィルムの二つの表面の内一つが図1および2のものと同一周期的表面形状を含む場合である。

#### 【0089】

図16（A）には存在しない図16（B）の明るい帯は、 $P=0.5\mu\text{m}$ の窪み列の表面プラズモンモードに相当し、周期的な表面形状の存在がさらに光伝送を強化することを示している。

#### 【0090】

上記の著しい伝送強化は、開口の大きな列に対してのみでなく小数の開口または単一の開口に対してさえ発生する。

#### 【0091】

図17は、周期 $P=0.5\mu\text{m}$ の窪み付き表面特殊形状を含む図4に示す光学素子のような周期的な表面形状を有する金属フィルムに設けられた単一開口の典型的な0次伝送スペクトルと、周期的な表面形状を持たない平滑な金属フィルム内の単一開口の典型的な0次伝送スペクトルとを比較する図である。

#### 【0092】

周期的に構成された表面の単一開口は、表面特殊形状の周期に望まれる伝送最大値、最小値を示し（参照：上記 Gh a e m i 他）、平滑な金属フィルムの単一開口の場合に比べて、最大伝送時において大きな伝送強化が観察される。

#### 【0093】

図15および図17に示す例において、例えば図2に示されるような開口は、例えば窪み等の表面特殊形状とともに配置されている。つまり、開口と表面特殊形状は位置的に整合し同調している。すなわち、開口は、さもなくば表面特殊形状に占拠される位置に配置されており、位置的に同調している。また、開口周期と表面特殊形状周期との比は簡単な整数であり、位置的に整合している。

#### 【0094】

もし、開口周期と表面特殊形状周期との比が簡単な整数であるが、開口が、さもなくば表面特殊形状に占拠される位置に配置されていなければ、開口列と表面特殊形状列とは整合しているが、この二列は同調していない。

#### 【0095】

もし、開口周期と表面特殊形状周期との比が簡単な整数でなければ、図18に示すように、開口列と表面特殊形状列とは位置的に整合していない。このような位置的に不整合な構造においては、本発明がもたらす強力伝送は、図18の位置51等の二つの周期的構造が

同調状態に近い位置においてのみ生じ、図 18 の位置 5 2 等の二つの列が同調していない場所では伝送力は強化されず、すなわち、低いものとなる。この状態を図 19 に示す。

【0096】

図 19 は白色光で均一に照明された状態において、図 18 に示されるような位置不整合構造から得る光の空間分布を示すワイヤー線図である。

【0097】

上記のように、一つ以上の開口と周期的表面形状を示す少なくとも一つの表面を有する金属フィルムの強力伝送スペクトルの状態は、表面に入射する光の角度により定まる。この角度依存効果を利用して図 20 に示す斬新な波長選択機能を有する光学フィルター 70 が作製された。上記のように作製された光学素子 10 は基板のような支持材 72 上に設置されるのが好ましく、支持材 72 は回転軸 74 に搭載されるのが好ましい。光学素子 10 の周期的表面形状を含む表面特殊形状は、周期的開口と位相が整合し同調していることが好ましい。

【0098】

図 20 において、破線は光学フィルター 70 の表面に垂直な垂線 N を表し、光学フィルター 70 への入射光角度は垂線 N に対する角度  $\theta$  で表す。光学フィルター 70 を回転調整して入射角  $\theta$  を変更し、図 13、図 14 および図 16 に示すように、光伝送が角度の関数としてピークになる波長を選択的に変動することができる。この性質を利用して、一つ以上の開口と周期的表面形状を有する、少なくとも一つの表面を有する金属フィルムを含み、所定の入射角を得るように調整できる光学フィルターを形成できる。フィルターの入射角が変動するにつれフィルターを通じる伝送光の波長もまた変動し、その値は選択した入射角に基づいて選択できる。

【0099】

上記の波長選択機能を有する光学フィルター 70 は、紫外線、可視光線および長波長光線に対して使用することができる。この光学フィルター 70 の利点は、出射光と入射光とが同一線上となるので、減衰が生じる全反射装置に比べて、光線を再指向する必要が無いことである（参照：上記 H. Raether）。さらに、周期的表面形状は従来技術とは明らかに異なる独特な新しい構造を備えている。特に従来技術の赤外線およびマイクロ波網装置は開口のみを含むが、本発明では開口と周期的表面形状の結合したものを特徴とする。

【0100】

本発明が提供する光学フィルターの他の変形例として空間光学フィルターがある。空間光学フィルターは、フィルターの表面に沿った選択した位置で波長および若しくは伝送光の強度の変動を行い得るフィルターである。

【0101】

本発明の空間光学フィルターは上記のように、周期的表面形状を含む表面特殊形状が周期的開口と不整合であるか、および、若しくは、非同調である光学素子 10 を利用する。表面特殊形状と開口間の整合性および若しくは位相差を変えることにより、図 18 および図 13 に示すように、任意の指定位置でフィルターを通じて伝送された伝送光の波長、および、若しくは、強度を制御することができる。例えば、周期的に配置された表面特殊形状は金属フィルム上において、いかなる指定位置においても周期的に配置した開口と同調、または、非同調するように位置させることができる。この配置において、表面特殊形状、すなわち、周期的表面形状が、周期的に配置された開口と同調している場所では開口を通じて強い伝送が生じる。また、表面特殊形状が周期的に配置された開口と同調していない場所では、開口を通じての強い伝送は発生しない。

【0102】

本発明の空間光学フィルターは、固定して搭載することもできるし、また、もし非整合、および、若しくは、非同調配列の影響と角度伝送依存とを結合しようと希望するなら、図 20 に示すように回転可能に搭載することができる。

【0103】

10

20

30

40

50

一つ以上の開口と周期的表面形状とを有する、少なくとも一つの表面の両方を備えた本発明の光学素子は、従来の網配列、すなわち、赤外線またはマイクロ波領域においてフィルターとして使用された粗な網、または、ワイヤー列と比較して、光学フィルターとして改善された波長選択性を示す。参照：R. Ulrich, "金属メッシュの遠赤外線領域特性とその構造 (Far-Infrared Properties Of Metallic Mesh And Its Complimentary Structure)", Infrared Physics, 巻7, 頁37-55 (1967); L. C. Botten 他, "共振領域における誘導性グリッド：理論と実験 (Inductive Grids In The Resonant Region: Theory And Experiment)", International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 巻6, 第7号, 頁511-575 (1985)。

10

#### 【0104】

さらに、ギャップ内のエネルギー状態の場合を除いて総ての波長において材料が不活性、または、不透明である光子バンドギャップ配列と異なり、本発明は結合が生ずる波長を除き総ての波長において不透明材料の使用を規定する。

#### 【0105】

本発明の他の用途として図21と図22に示す集光装置がある。Incidentの矢印で表示される光が光学素子10に入射する。光学素子10は基板80上に堆積した金属フィルム20を有する。図21に示すように、金属フィルム20は複数の開口30を備え、かつ、少なくともその一つの表面上に配置された周期的配列の表面特殊形状40を有する。周期的表面特殊形状40と結合した後、集光は複数の開口30を通じて、好ましくは、各開口30にできるだけ近く連通するように対応して設けられた複数の光ファイバー82に移動する。なお、図22に示すように単一の開口30を金属フィルムに設けても良い。ここでは単一の光ファイバー82が単一の開口30と連通して集光しており、光が一つの光ファイバー82に伝送される。

20

#### 【0106】

図21および図22に示される集光器において、開口30を通りファイバー82に入る光の強度は、上記のように本発明の光学素子10により強化される。

#### 【0107】

開口30の縦横比は重大ではなく、上記のように強力集光の波長を決定するには表面特殊形状40の周期が重要である（参照：例えば上記の式(3)および(4)）。

30

#### 【0108】

以前は光の波長より短い径の光ファイバーに光を導くことは困難であった。光の方向を決めるのに複雑なレンズおよび調節装置が使用された。本発明においては、開口のある面の表面範囲よりも多くの光が開口を伝送するため、金属開口と表面特殊形状の配列が集光器のように作用する。結果的に、ファイバー（もし開口が光波長未満の径ならばその長さの径のファイバーを含む）への光の導入が効率的になる。実際に本発明の集光器は、本発明に使用された一つ以上の開口と周期的表面特殊形状の組合わせに対抗して開口のみの列を利用する集光器より尚一層効率的である。

40

#### 【0109】

単一開口を有する構造表面の他の用途としては、走査型近接場光学顕微鏡法 (NSOM: Near-field Scanning Optical Microscopy) における用途がある。図23ないし図25のそれぞれは本発明に準拠して製造した走査型近接場光学顕微鏡装置を示す図である。

#### 【0110】

図23および図24に示すように、光源90は支持材（図示せず）に支えられた試料92を通じて、集光器として作用する装置100に光を伝送する。装置100は正面102を有する光伝送装置である。上記の光伝送装置100で利用された金属フィルム20に相当する金属フィルム104を、例えば堆積により、装置の正面102に固定する。金属フィル

50

ム 1 0 4 は装置が集めた光の強度を増すために、単一の波長未満径の開口 1 0 6 と配列された窪み等の表面特殊形状 1 0 8 を含む。

【 0 1 1 1 】

図 2 3 に矢印で示すように、装置が集めた光は、装置を通じて従来公知の N S O M 信号処理作業に送られる。周期的な表面形状は、試料に対面する金属フィルム 1 0 4 側に設けても或は試料の反対側で装置 1 0 0 の正面 1 0 2 に隣接する金属フィルム側に設けてもよいことに注目すべきである。

【 0 1 1 2 】

図 2 5 は本発明による走査型近接場光学顕微鏡装置の他の実施例の構造を示す図である。ここで、装置 1 0 0 は、集光器（集光モード）としてではなく、光源（放射モード）として作用する。装置の構造は図 2 3 および図 2 4 に示すものと同様である。図 2 5 の矢印に示すように、光は装置 1 0 0 に入り正面 1 0 2 に向かう。光は金属フィルム 1 0 4 の露出面上の窪み等の周期的配列の表面特殊形状 1 0 8 と結合する。続いて、光は正面 1 0 2 上の単一の波長未満径の開口 1 0 6 を経由して試料 9 2 を通り、従来から行われている信号処理のため光検出器 9 4 に伝送される。少なくとも二つの表面特殊形状 1 0 8 が装置 1 0 0 の正面 1 0 2 上の金属フィルム 1 0 4 に存在することにより、装置 1 0 0 から試料 9 2 に入り、次いで、光検出器 9 4 で集光される伝送光の強度が増大される。

【 0 1 1 3 】

N S O M の解像度は開口の寸法により決定され、径が小さい程解像度が向上する。しかし実際には、上記のように波長未満径の開口の伝送量は  $(d/\lambda)^4$  で減少し、発生する信号の強度が非常に低くなるから、達成できる解像度には実際上の限度がある。したがって、より良い解像度を達成するために開口がより小さく作られるにつれて、本発明の単一の波長未満径の開口による N S O M 装置にて行われる強い光伝送は、周期的表面形状とあいまって従来の N S O M に比べるとますます有利となる。それは本発明の光伝送は、開口の表面積に直線的に依存し、波長は開口を取り巻く表面特殊形状の周期と規則性に依ってのみ決定されるからである。換言すれば、本発明の N S O M 装置は上記の  $(d/\lambda)^4$  で依存性に妨害されないことによる。

【 0 1 1 4 】

図 2 6 および図 2 7 に示す他の実施例では、一つ、または、複数の開口を有する本発明による光学素子を使用し、金属マスク内の周期的表面特殊形状と開口の配置を工夫して、サブ波長写真平板印刷用の斬新なマスクを作ることができる。

【 0 1 1 5 】

マスク 1 2 0 は不図示の基板上に堆積され、一つ以上の開口 1 2 4 を有する金属フィルム 1 2 2 を含んでいる。金属フィルム 1 2 2 の第 1 の表面 1 2 2 a 上に周期的表面形状を構成するように、窪み等の複数の周期的に配置された表面特殊形状 1 2 6 を金属フィルム 1 2 2 の第 1 の表面 1 2 2 a 上に設ける。開口 1 2 4 の直径よりずっと大きい波長  $\lambda$  を有する入射光 1 3 0 は、マスク 1 2 0 の第 1 の表面 1 2 2 a に向けられる。入射光 1 3 0 は周期的表面形状と結合し、 $(\lambda/2)$  よりずっと小さい特異形状を持つ写真石版画像を作るために、開口 1 2 4 を通り金属フィルム 1 2 2 に投影される。

【 0 1 1 6 】

本発明の写真石版作業を例示するため、感光材料を塗布した基板 1 4 0 上の文字 H の写しと二つの点を図 2 6 と図 2 7 に示す。転写する画像（この場合文字 H）に対応する配置で、スリット状の開口 1 2 4 a が金属フィルム 1 2 2 内に形成される。さらに、円形または点状の開口 1 2 4 b が、二つの点の画像として作られる。光 1 3 0 はマスク 1 2 0 を指向し、ついで光は上記のように、表面特殊形状 1 2 6 がもたらした周期的表面形状による増強された伝送効果と共に、開口 1 2 4 a と 1 2 4 b を通り伝送される。その結果、感光性耐蝕膜被覆の基板 1 4 0 が希望した画像 1 4 2 のパターンで露出される。

【 0 1 1 7 】

本発明のフォトリソグラフィーマスクは、強度の U V および X 線源を使用することなく、感光性材料上に波長未満の幅の点または線を描くことができる。強い線源の代わりに、通

10

20

30

40

50

常のUV線源または可視光線源さえも使用できる。さらに、本発明ではX線感光性耐蝕膜の代わりに、従来の感光材料、例えばUV感光性または可視光感光性耐蝕膜を使用できる。

【0118】

以上ある種の用途における各種の光学素子につき記述、例示してきたが、当業者には明らかなように、ここに添付する請求の範囲に依ってのみ限定される本発明の精神および広い教義から逸脱することなく変更、修正が可能である。

【0119】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明による装置においては、強力な光伝送が行われる。

10

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明による光学素子の典型的実施例の斜視図である。

【図2】図1に示す光学素子の金属フィルムの第1の表面の平面図である。

【図3】図1に示す光学素子の金属フィルムの第2の表面の平面図である。

【図4】本発明による光学素子の他の実施例の金属フィルムの第1の表面の平面図である。

【図5】本発明による光学素子の他の実施例の金属フィルムの第2の表面の平面図である。

【図6】本発明による光学素子のさらに他の実施例の金属フィルムの第1の表面の平面図である。

20

【図7】本発明による光学素子のさらに他の実施例の金属フィルムの第2の表面の平面図である。

【図8】本発明による光学素子のさらに他の実施例の金属フィルムの第1の表面の平面図である。

【図9】本発明による光学素子のさらに他の実施例の金属フィルムの第2の表面の平面図である。

【図10】本発明による光学素子のさらに他の実施例の金属フィルムの第1の表面の平面図である。

【図11】本発明による光学素子のさらに他の実施例の金属フィルムの第2の表面の平面図である。

30

【図12】本発明のによる光学素子に関する入射および出射光の幾何学的配置を示す概略斜視図である。

【図13】開口の列が開けられた金属フィルムを通して行う光の伝送を、入射光の光子エネルギーおよび入射角の関数として表示するグラフで、金属フィルムの二つの表面がいずれも周期的表面形状を含まない場合である。

【図14】開口の列が明けられた金属フィルムを通して行う光の伝送を、入射光の光子エネルギーおよび入射角の関数として表示するグラフで、金属フィルムの二つの表面のうち一つが図1および2に示す周期的表面形状を含む場合である。

【図15】二つの金属フィルムの0次伝送を示すグラフである。一方の金属フィルムは周期  $P = 1 \mu m$  で円形開口の正方配列を備え、他方の金属フィルムは同じ周期  $P$  で同じ配列の開口を備え別に位置的に開口と整合し  $P/2$  の周期を持つ周期的表面形状を備えた表面を有する。

40

【図16】(A)は、開口の列が明いた金属フィルムを通して行う光の伝送を、光子エネルギー  $E = hc/\lambda$ 、および  $k_x = k \sin \theta$  の関数としてグレースケールで表示するグラフで、金属フィルムの二つの表面がいずれも周期的表面形状を含まない場合である。(B)は、開口の列が明いた金属フィルムを通して行う光の伝送を、光子エネルギー  $E = hc/\lambda$ 、および  $k_x = k \sin \theta$  の関数としてグレースケールで表示するグラフで、金属フィルムの二つの表面の内一つが図1および2のものと同一周期的表面形状を含む場合である。

【図17】二つの金属フィルムの0次伝送を示すグラフである。各金属フィルムは単一の

50

開口を有し、一方の金属フィルムは名目上平滑な表面を有し、他方の金属フィルムは周期  $P = 0.5 \mu\text{m}$  の周期的表面形状を備えた表面を有する。

【図 18】開口の列と周期的表面形状を有する金属フィルムの平面図で、周期的表面形状を含む表面特殊形状の周期は  $P = 0.5 \mu\text{m}$ 、開口の列の周期は  $1.06 \mu\text{m}$  で、周期的表面特殊形状の列と開口の列は位置的に不整合である。

【図 19】図 18 に示した金属フィルムを通して伝送された 0 次伝送白色光の空間分布を示すワイヤー線図である。

【図 20】光の入射角を変更して通過する光の伝送を選択的に変更する装置を示す斜視概略図で、かかる装置は波長選択光学フィルターとして有効である。

10

【図 21】本発明による集光器の概略斜視図である。

【図 22】本発明による集光器の概略斜視図である。

【図 23】本発明による走査型近接場光学顕微鏡装置の概略斜視図で、装置は集光モードで作業中である。

【図 24】本発明による走査型近接場光学顕微鏡装置の分解した概略図である。

【図 25】本発明による走査型近接場光学顕微鏡装置の概略斜視図で、装置は放射モードで作業中である。

【図 26】フォトリソグラフィーマスクとして利用された本発明の光学素子の概略斜視図である。

【図 27】本発明を使用したフォトリソグラフィーマスクにより、光電性被覆を有する基板上に転写された最終的パターンを示す斜視概略図である。

20

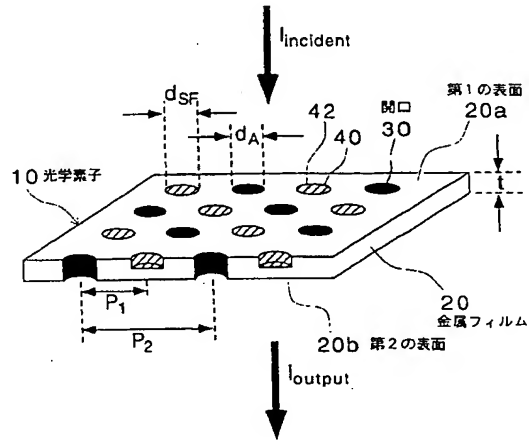
#### 【符号の説明】

10	光学素子
20	金属フィルム
20a	第1の表面
20b	第2の表面
30	開口
40	表面特殊形状
42	窪み
46	溝
70	光学フィルター
72	支持材
74	回転軸
80	基板
82	光ファイバー
90	光源
92	試料
94	光検出器
100	装置
102	正面
104	金属フィルム
106	開口
108	表面特殊形状
120	マスク
122	金属フィルム
122a	第1の表面
124a, 124b	開口
126	表面特殊形状
130	入射光
140	基板

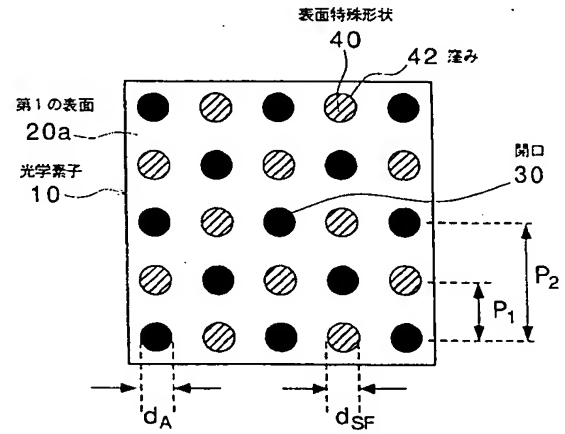
30

40

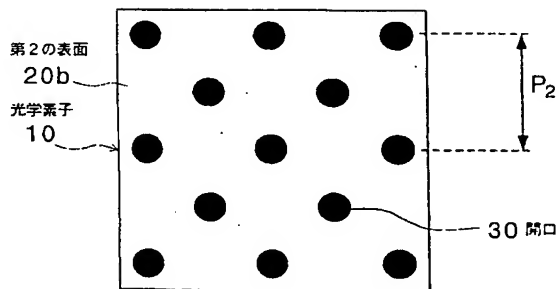
【図 1】



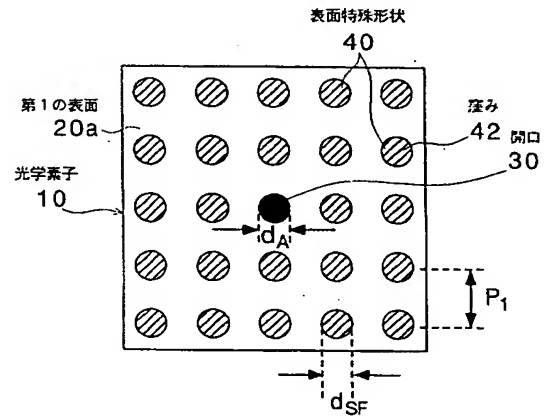
【図 2】



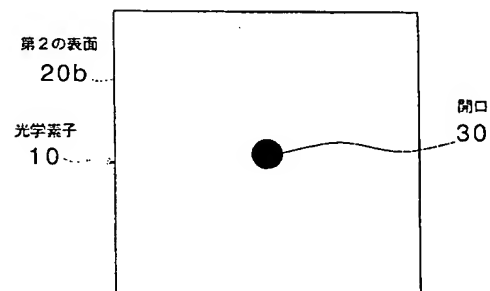
【図 3】



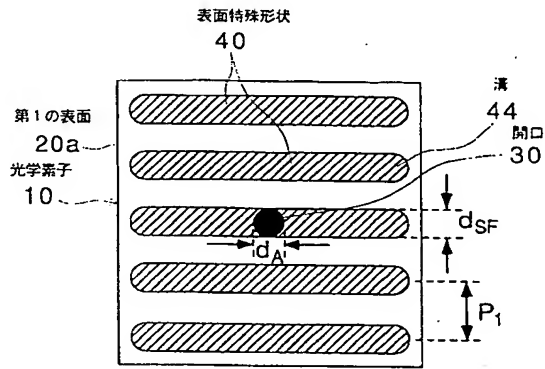
【図 4】



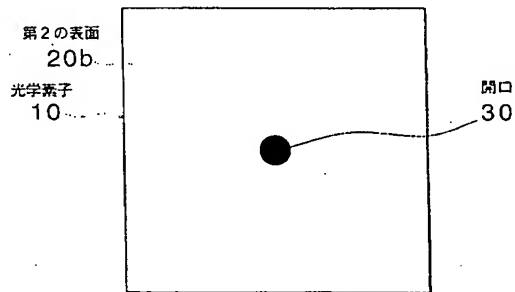
【図 5】



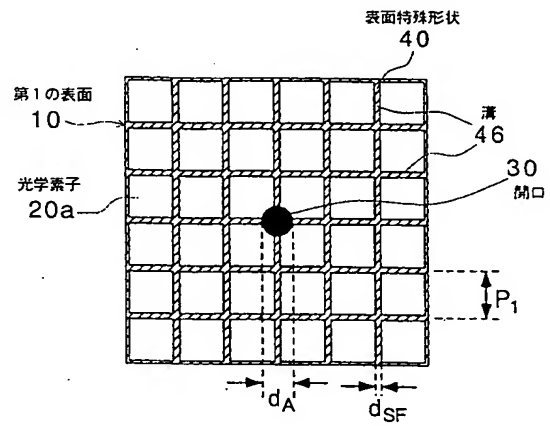
【図 6】



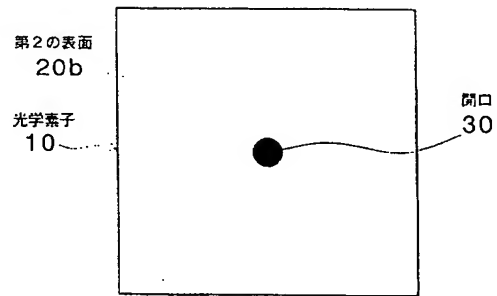
【図 7】



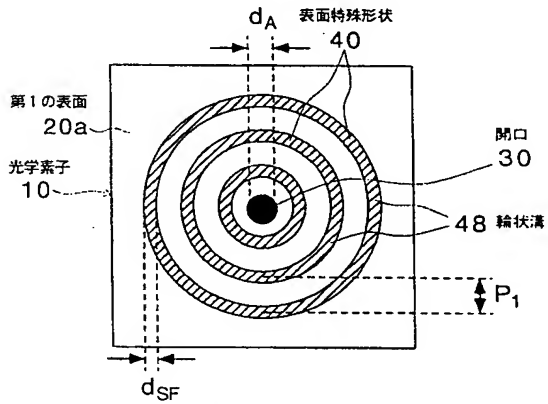
【図 8】



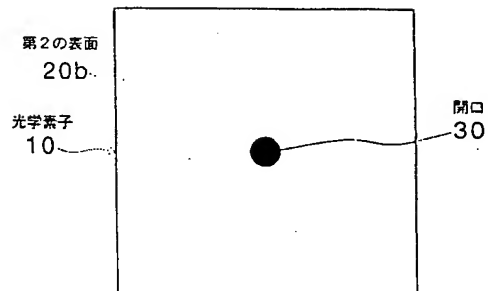
【図 9】



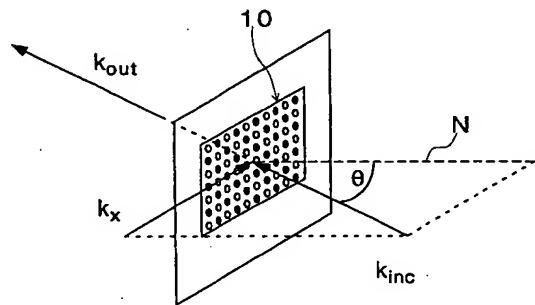
【図 10】



【図 11】

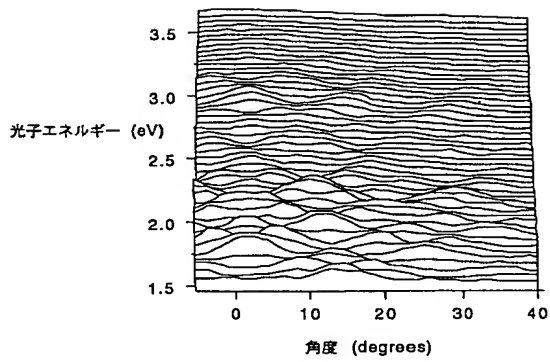


【図 12】

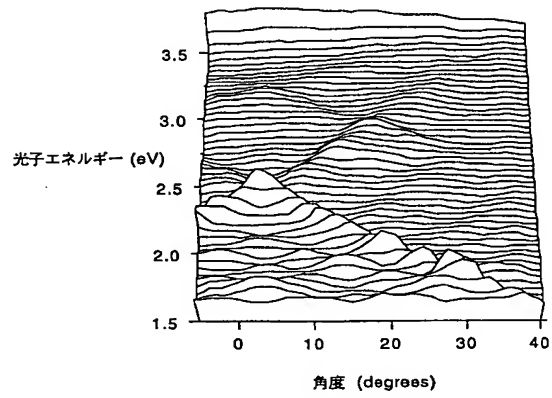




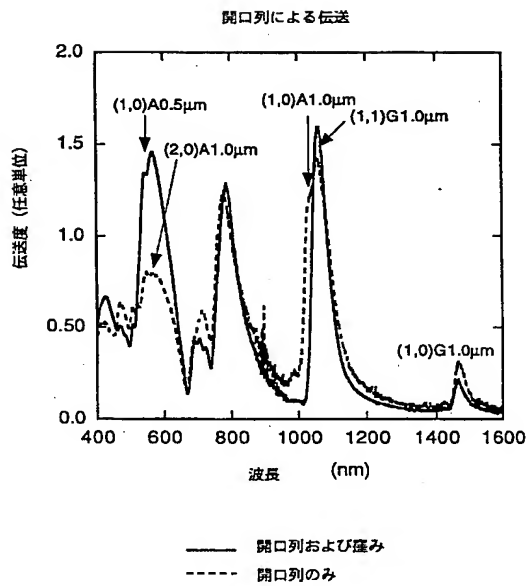
【図 13】



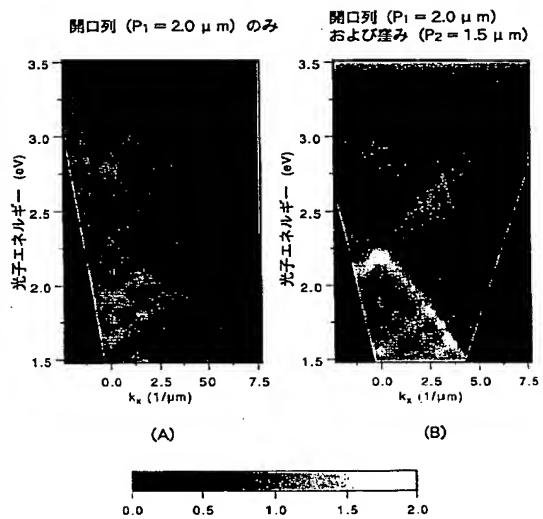
【図 14】



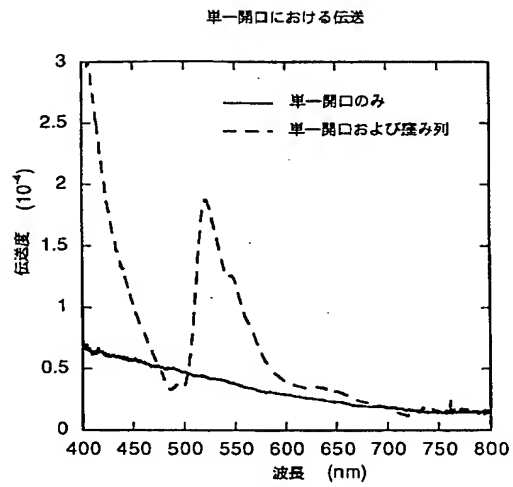
【図 15】



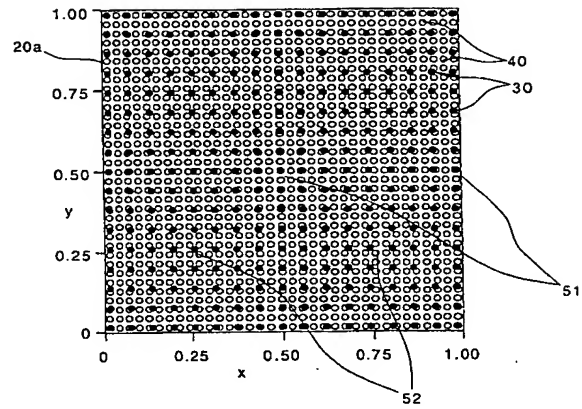
【図 16】



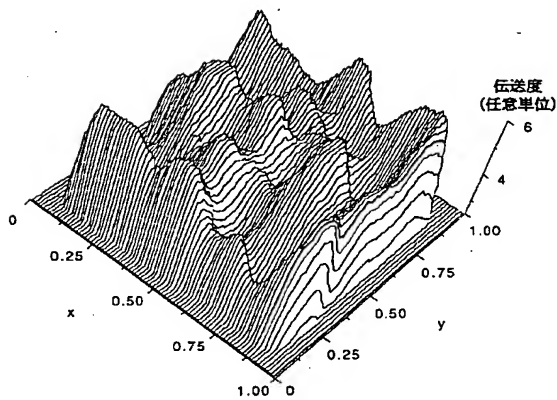
【図 17】



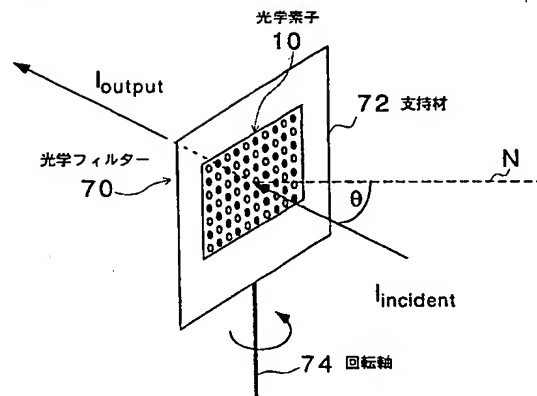
【図 18】



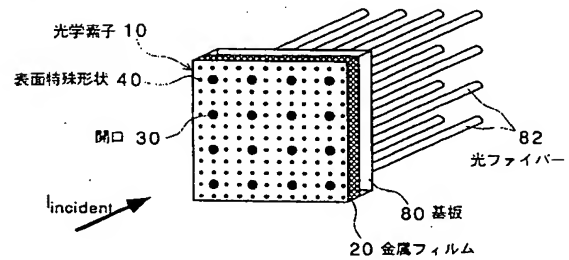
【図 19】



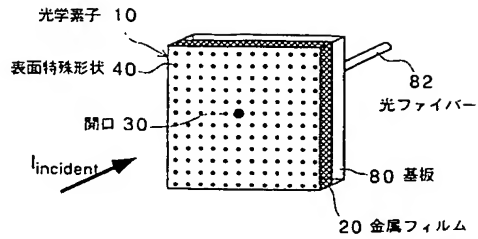
【図 20】



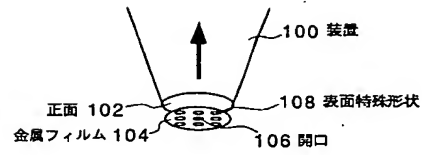
【図 21】



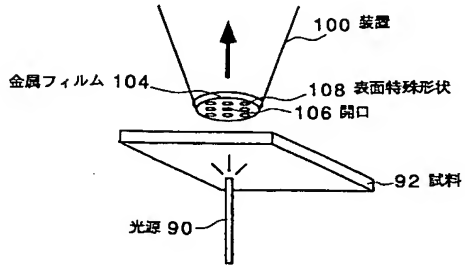
【図 2 2】



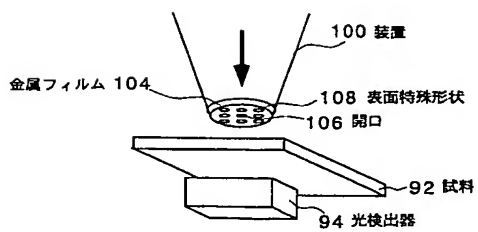
【図 2 4】



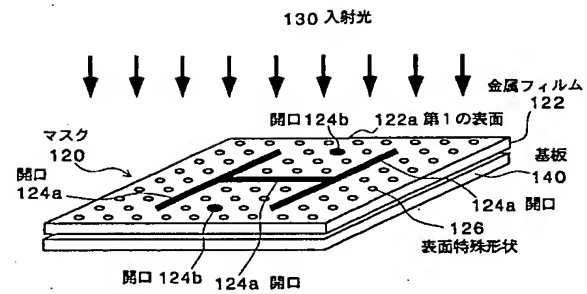
【図 2 3】



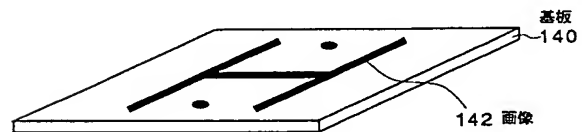
【図 2 5】



【図 2 6】



【図 2 7】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.<sup>7</sup>

F I

テーマコード (参考)

H 0 1 L 21/30 5 0 2 D

(72)発明者 トーマス エブソン

アメリカ合衆国、 ニュージャージー 0 8 5 4 0 プリンストン、 4 インディペンデンス  
ウェイ エヌ イー シー リサーチ インスティテューテュ インク内

(72)発明者 ダニエル グラップ

アメリカ合衆国、 ニュージャージー 0 8 5 4 0 プリンストン、 4 インディペンデンス  
ウェイ エヌ イー シー リサーチ インスティテューテュ インク内

(72)発明者 テュニカ ティオ

アメリカ合衆国、 ニュージャージー 0 8 5 4 0 プリンストン、 4 インディペンデンス  
ウェイ エヌ イー シー リサーチ インスティテューテュ インク内

(72)発明者 ヘンリー レゼック

アメリカ合衆国、 ニュージャージー 0 8 5 4 0 プリンストン、 4 インディペンデンス  
ウェイ エヌ イー シー リサーチ インスティテューテュ インク内

F ターム(参考) 2H052 AA07 AC05 AC29 AC30 AF06

2H079 AA08 BA01 BA04 CA04 CA24 DA01

2H095 BB01 BB02

5F046 BA10 CB17